# 飞机多钉壁板混合结构热应力分析与验证

雷凯,王彬文,成竹,邓文亮,吴敬涛

(中国飞机强度研究所,710065 西安)

**摘　要:**为了研究飞机机械连接混合结构在运营环境极端温度下产生的热应力,在刚度法基础上考虑温度场引起的变形,推导了典型单搭接连接件由热应力引起的钉载计算理论公式。针对壁板等较为复杂的大尺寸结构热应力分析难题,以铝合金"Z"型长桁和复合材料蒙皮通过40个螺钉机械连接组成的多钉壁板为研究对象,基于梁-壳组合单元,建立了壁板结构2维仿真模型,获取了结构热应力和钉载分布规律。此外,通过开展低温环境试验,分析了结构中复合材料及金属在不同温度下由热应力引起的应变。结果表明,有限元分析和试验数据具有较好的一致性,通过平面建模方法可以有效减低多钉连接结构建模难度及计算量;多钉壁板的钉载分布规律为"U"型,最大载荷量级约为3 500 N,为后续结构强度分析提供依据。

**关键词:**复合材料;热膨胀系数;热应力;多钉壁板;钉载;有限元分析

**中图分类号:**V214.1　　**文献标志码:**A

# Thermal stress analysis and verification of aircraft multi-bolt hybrid panel structure

LEI Kai,WANG Binwen,CHENG Zhu,DENG Wenliang,WU Jingtao

(Aircraft Strength Research Institute of China,710065 Xi'an,China)

**Abstract:**In order to study the thermal stress of aircraft mechanical joint hybrid structure under extreme temperature of service environment,the theoretical formula for calculating bolt load of typical single lap joints caused by thermal stress was derived based on the stiffness method considering the deformation caused by temperature field. Aiming at the thermal stress analysis of complex large-size structures such as wall plates,the hybrid panel composed of Z shaped aluminum alloy stringer and composite skin through 40 bolts was used as the research object. The two-dimensional simulation model of the panel structure was established based on the beam-shell combination unit and the thermal stress and nail load distribution rules of the structure were obtained. In addition,through the low temperature environment test,the strain caused by thermal stress of composite materials and metals in the structure at different temperatures was analyzed. The results show that the finite element analysis results are consistent well with the test data and the plane modeling method can effectively reduce the modeling difficulty and calculation amount. The distribution of

**收稿日期:**2022-12-08　　**修回日期:**2022-12-23

**基金项目:**国家民机科研资助项目(No. MJZ-2017-F-18)

**通信作者:**王彬文,研究员。E-mail:asriwbw@vip.163.com

**引用格式:**雷凯,王彬文,成竹,等.飞机多钉壁板混合结构热应力分析与验证[J].应用力学学报,2023,40(1):40-47.
LEI Kai,WANG Binwen,CHENG Zhu,et al. Thermal stress analysis and verification of aircraft multi-bolt hybrid panel structure[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(1):40-47.

blot load is U-type and the maximum load magnitude is about 3500N, which provides a basis for structural strength analysis.

**Key words**: composite material; coefficient of thermal expansion; thermal stress; multi-bolt panel; bolt load; finite element analysis



碳纤维复合材料具备比模量和比强度高、耐疲劳、耐高温以及热稳定性好等一系列优点[1]，在航空领域的应用逐步扩大，和传统的金属材料（铝合金、钛合金以及合金钢等）组成了飞机的主要结构[2]。复合材料与金属组成了各类混合结构，如“复合材料壁板＋金属梁”、“复合材料壁板＋复合材料梁＋金属肋”等，在飞机结构中的占比不断增加[3]。由于两种材料热膨胀系数的差异较大，在极端温度环境下由于紧固件对变形的限制将产生热应力，使得飞机结构受力状态不再是单一的外部机械力[4]。在机械连接方式下，热应力将在钉孔区域产生应力集中现象，对结构承载能力带来影响。目前主要通过环境因子补偿法验证热应力对结构强度的影响，但环境补偿系数值的确定尚缺乏一套合理的分析模型[5]，主要依赖积木式试验及工程经验，往往过于保守。随着我国 CR929 等飞机型号在结构选材中应用复合材料比例的不断提高，复合材料-金属混合结构设计及强度分析成为亟需解决的问题。

针对机械连接混合结构，在常温环境外载作用下的钉载分配以及静强度和疲劳强度方面开展了大量研究[6-10]。当温度载荷作用时，热应力主要集中载钉孔区域，引起附加钉载。开展的主要研究包括：KRODINOV 等[11]采用复杂势能理论（complex potential theory）研究了机械载荷和均匀温度变化条件下，复合材料层合板中任意位置螺栓的孔边应力，分析了螺栓载荷在单搭接和双搭接接头中的分布；朱梓珣[12]研究了复合材料-铝合金单列三螺钉连接件在拉伸载荷下，施加 −75 ℃低温和 100 ℃高温环境对螺栓载荷分配的影响，得到温度会导致螺钉载荷分配不均匀程度提高的结论；YANG 等[13]推导了温度作用下混合结构连接件的钉载计算公式，并开展了不同结构形式的复合材料-金属壁板结构温度场试验，得到了钉载“U”型分配规律，但未给出载荷值。LEI 等[14]针对复合材料-金属单搭接多钉结构，分析了不同结构形式下螺钉数量、螺钉间距等参数对钉载分布的影响，揭示了最大钉载受结构尺寸效应限制的规律；蔡启阳等[15]研究了不同温度载荷及机械载荷联合作用下的三钉连接件钉载分布规律，表明初始阶段会加剧钉载分配不均，在塑性影响下最终趋于一致。针对该壁板结构，邓文亮等[16]通过有限元建模分析了热应力分布规律，此外研究了五钉连接件在不同高低温下钉载分布规律[17]。杨俊清等[18]建立了飞机复合材料蒙皮和钛合金框组成结构的简化模型，分析了 −75 ℃下的整体热应力。郭居上[19]针对飞机尾翼处复合材料与金属板钉接组合结构，通过有限元建模方法，研究了 70 ℃温度场对其内应力分布和螺钉载荷分配的影响。魏洪等[20]通过有限元方法以 5 钉复材-金属连接件为研究对象，分析了温差、铺层比例、螺栓间距等对热应力的影响。高阳[21]通过仿真分析了飞机中央翼金属-复合材料混合连接结构在温度场下的热应力，表面外侧螺钉承担主要载荷。此外，针对复合材料补片修理飞机金属结构时由于热膨胀系数等差异产生的热应力问题，开展了相关研究[22-23]。

从混合结构热应力公开的研究资料可以看出，目前主要以小型连接件级结构为研究对象，由于热应力值较小引起测量误差较大，因此研究方法多以仿真分析为主。此外，机械连接混合结构热应力量级受尺寸效应影响，最大钉载随连接件长度和螺钉数量的增加，在快速增长后趋于稳定[13-14]。因此，开展大尺寸混合结构热应力研究更具有代表性。本研究针对壁板级混合结构，通过仿真分析并结合试验验证给出结构热应力的具体量级，为飞机结构强度分析提供参考。

## 1 温度引起的混合结构连接件钉载计算理论

针对典型机械连接混合结构，基于弹性静不定力法[24]，推导考虑温度场的钉载计算方法。针对图 1 中的典型连接件，其中，符号 A 代表复合材料，符号 B 代表金属，钉从左向右编号，载荷分别为 $P_1, P_2, \cdots, P_n$。当结构在自由膨胀状态下施加温度场后，假设引起图中给出的载荷形式。由于热应力为内部载荷，因此总钉载大小为 0，可得式（1）。

$$P_1 + P_2 + \cdots + P_n = 0 \tag{1}$$

选取相邻两钉间的结构为代表单元，在温度载

荷作用下的变形如图 2 所示。

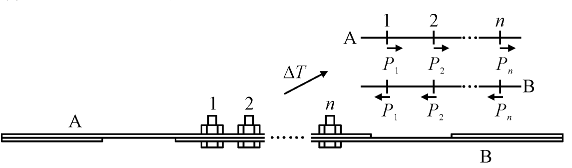



图 1　混合结构螺钉载荷分布形式

Fig. 1　Assumedbolt load distribution form of hybrid structure

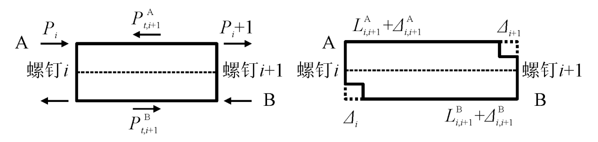



图 2　连接件代表单元变形示意图

Fig. 2　The deformation diagram of specific unit of joint

图 2 中，$L^A_{i,i+1}$ 和 $L^B_{i,i+1}$ 分别为 A 板和 B 板第 $i$ 和第 $i+1$ 两钉间距离，二者值相等；$\Delta^A_{i,i+1}$ 和 $\Delta^B_{i,i+1}$ 分别为 A 板和 B 板第 $i$ 和第 $i+1$ 两钉间由于钉载和热膨胀引起的变形；$\Delta_i$ 为第 $i$ 钉在钉载下产生的剪切变形。得到各代表单元的变形协调方程如式(2)所示。

$$\begin{cases}\Delta_1-\Delta_2=\Delta^A_{1,2}-\Delta^B_{1,2}\\ \Delta_2-\Delta_3=\Delta^A_{2,3}-\Delta^B_{2,3}\\ \cdots\\ \Delta_{n-1}-\Delta_n=\Delta^A_{n-1,n}-\Delta^B_{n-1,n}\end{cases}\tag{2}$$

$\Delta^A_{i,i+1}$、$\Delta^B_{i,i+1}$ 和 $\Delta_i$ 通过公式(3)计算得到，图 3 为第 $i$ 和第 $i+1$ 两钉间板受钉载 $P_1, P_2, \cdots, P_j, \cdots, P_i$ 作用的示意图。

图 3　连接件中板受钉载作用示意图

Fig. 3　Deformation of plate in the joint under bolt load

$$\begin{cases}\Delta_i=\dfrac{P_i}{K^D_i}\\ \Delta^A_{i,i+1}=\dfrac{-P_1}{K^A_{1,i+1}}+\dfrac{-P_2}{K^A_{2,i+1}}+\cdots+\dfrac{-P_j}{K^A_{j,i+1}}+\cdots+\dfrac{-P_i}{K^A_{i,i+1}}+\alpha_A\Delta T_A L^A_{i,i+1}\\ \Delta^B_{i,i+1}=\dfrac{P_1}{K^B_{1,i+1}}+\dfrac{P_2}{K^B_{2,i+1}}+\cdots+\dfrac{P_j}{K^B_{j,i+1}}+\cdots+\dfrac{P_i}{K^B_{i,i+1}}+\alpha_B\Delta T_B L^B_{i,i+1}\end{cases}\tag{3}$$

式中：$\Delta T_A$ 与 $\Delta T_B$ 分别为 A 板和 B 板的温差；$K^D_i$ 定义为第 $i$ 钉的剪切刚度；$K^A_{j,i+1}$ $(j\leqslant i)$ 定义为 A 板的轴向刚度，表示第 $j$ 钉的单位载荷引起 A 板第 $i$ 和 $i+1$ 两钉间的轴向变形；$K^B_{j,i+1}$ $(j\leqslant i)$ 定义为 B 板的轴向刚度，表示第 $j$ 钉的单位载荷引起 B 板第 $i$ 和 $i+1$ 两钉间的轴向变形；$\alpha_A$ 与 $\alpha_B$ 分别为 2 种材料的轴向热膨胀系数。

结合式(1)中给定的边界条件，推导可得如下公式。

$$\boldsymbol{P}=\boldsymbol{F}^{-1}\boldsymbol{A}\tag{4}$$

其中

$$\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix}\dfrac{1}{K^D_1}+\dfrac{1}{K^A_{1,2}}+\dfrac{1}{K^B_{1,2}} & -\dfrac{1}{K^D_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ \dfrac{1}{K^A_{2,3}}+\dfrac{1}{K^B_{2,3}} & \dfrac{1}{K^D_2}+\dfrac{1}{K^A_{2,3}}+\dfrac{1}{K^B_{2,3}} & -\dfrac{1}{K^D_3} & 0 & 0 & 0 & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \dfrac{1}{K^A_{i,i+1}}+\dfrac{1}{K^B_{i,i+1}} & \dfrac{1}{K^A_{i,i+1}}+\dfrac{1}{K^B_{i,i+1}} & \cdots & \dfrac{1}{K^D_i}+\dfrac{1}{K^A_{i,i+1}}+\dfrac{1}{K^B_{i,i+1}} & -\dfrac{1}{K^D_{i+1}} & \cdots & \cdots\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \dfrac{1}{K^A_{n-1,n}}+\dfrac{1}{K^B_{n-1,n}} & \dfrac{1}{K^A_{n-1,n}}+\dfrac{1}{K^B_{n-1,n}} & \cdots & \cdots & \dfrac{1}{K^A_{n-1,n}}+\dfrac{1}{K^B_{n-1,n}} & \dfrac{1}{K^D_{n-1}}+\dfrac{1}{K^A_{n-1,n}}+\dfrac{1}{K^B_{n-1,n}} & -\dfrac{1}{K^D_n}\\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{P}=[P_1\quad P_2\quad P_3\quad\cdots\quad P_i\quad\cdots\quad P_n]^T$$

$$\boldsymbol{A}=[\alpha_A\Delta T_A L^A_{1,2}-\alpha_B\Delta T_B L^B_{1,2}\quad \alpha_A\Delta T_A L^A_{2,3}-\alpha_B\Delta T_B L^B_{2,3}\quad\cdots\quad \alpha_A\Delta T_A L^A_{i,i+1}-\alpha_B\Delta T_B L^B_{i,i+1}\quad\cdots\quad \alpha_A\Delta T_A L^A_{n-1,n}-\alpha_B\Delta T_B L^B_{n-1,n}\quad 0]^T$$

针对形式单一的典型混合结构连接件,各螺钉的剪切刚度及板的轴向刚度可以通过工程计算或仿真分析获取[25]。该算法可以便捷的获取混合结构在温度场达到稳态下引起的钉载。对于壁板类形式较为复杂的结构,由于相关参数难以准确计算,进行结构简化会降低计算精度,因此通常采用仿真建模方法进行分析。

## 2 研究对象

本研究对象为图 4 所示的混合结构壁板,该壁板由铝合金"Z"型长桁通过 40 个螺钉和复合材料蒙皮机械连接组成。复合材料预浸料为 MTM28/T700,采用热压罐成型工艺,固化后单层厚度为 0.12 mm,铺层为[45/-45/0/0/-45/0/90/45/0/-45/0/90/45/0]s,共 28 层。金属板为铝合金 7050-T7451,螺钉材料为 30CrMnSiA,孔径为 6 mm,相邻螺钉间距为 24 mm。针对该混合结构壁板,分析其在自由膨胀状态下施加最低至 -40 ℃低温时结构产生的热应力情况。材料属性如表 1 和表 2 所示,由于 -40 ℃不会引起材料弹性模量的显著变化[26-27],因此,混合结构壁板热应力分析中未考虑由于温度引起的模量变化。

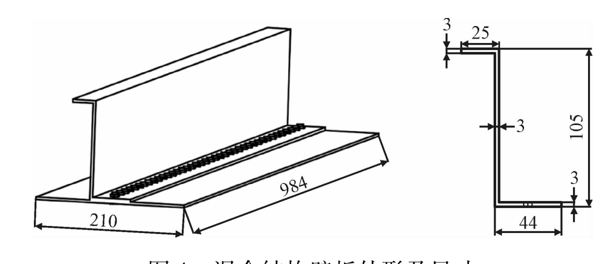



图 4 混合结构壁板外形及尺寸

Fig. 4 The shape and dimension of hybrid panel structure

表 1 复合材料属性

Tab. 1 Material properties of composite

| 材料工程常数 | | | | 材料单层热膨胀系数 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $E_1$/GPa | $E_2$/GPa | $\mu_{12}$ | $G_{12}$/GPa | $\alpha_1/(10^{-6}\cdot K^{-1})$ | $\alpha_2/(10^{-6}\cdot K^{-1})$ | $\alpha_3/(10^{-6}\cdot K^{-1})$ |
| 127 | 8.4 | 0.33 | 3.69 | 0.07 | 25.8 | 25.8 |

表 2 铝合金和 30CrMnSiA 材料属性

Tab. 2 Material properties of aluminum alloy and 30CrMnSiA

| 材料种类 | 材料属性 | | |
|---|---|---|---|
| | $E$/GPa | $\mu$ | $\alpha/(10^{-6}\cdot K^{-1})$ |
| 7075 铝合金 | 71 | 0.3 | 23 |
| 30CrMnSiA | 210 | 0.3 | 8.8 |

## 3 温度场下混合结构壁板有限元仿真研究

### 3.1 建模方法简述

由于壁板结构尺寸相对螺钉较大,且螺钉数量较多,使得建立三维实体模型工作量较大。本研究通过平面模型分析该壁板的热应力,其中,复合材料层合板和金属板由壳单元模拟;螺钉由梁单元和两个刚性圆柱壳组成,赋予该梁元相应的材料属性以模拟螺栓的弹性刚度,并通过两个刚性面模拟螺栓与孔的接触面,在所有自由度方向上将刚性面的参考点和梁单元节点在孔心处耦合,以调用梁单元材料的全部刚度,将刚性面上承受的接触力传递给模拟螺栓杆的梁单元。此外,由于平面模型简化了螺栓头、螺母、垫圈等,因此将梁元主节点和孔边区域节点在 $X$ 和 $Y$ 方向上的转动自由度加以耦合,模拟相关约束作用。为了模拟螺栓和孔的热膨胀不匹配问题,通过公式(5)在模型中设置了刚性面与螺栓孔的干涉过盈配合值。

$$L = \Delta T \times \Delta a \times r \tag{5}$$

式中:$L$ 为干涉量大小; $\Delta T$ 为结构温差; $\Delta a$ 为螺栓与螺栓孔结构材料热膨胀系数的差值;$r$ 为螺栓的半径。

以复合材料铝合金单搭接三钉混合结构为算例,建立的有限元模型如图 5 所示。施加初始 21 ℃的温度场,当降温至 -40 ℃时,两种建模方法得到的螺钉载荷如表 3 所示,其中,以复合材料板最外侧螺钉为编号 1,中间螺钉为编号 2,内侧螺钉为编号 3。两种建模方法得到的螺钉载荷都集中在结构两侧,平面模型得到的两侧螺钉载荷值和三维模拟计算结果误差在 4% 以内,具有足够的计算精度。

表 3 三钉连接件有限元分析结果

Tab. 3 Finite element analysis results of three-bolt joint

| 建模方法 | 螺钉载荷/N | | |
|---|---|---|---|
| | 螺钉 1 | 螺钉 2 | 螺钉 3 |
| 三维模型 | 735.64 | -1.09 | -734.85 |
| 平面模型 | 762.08 | 7.14 | -759.05 |

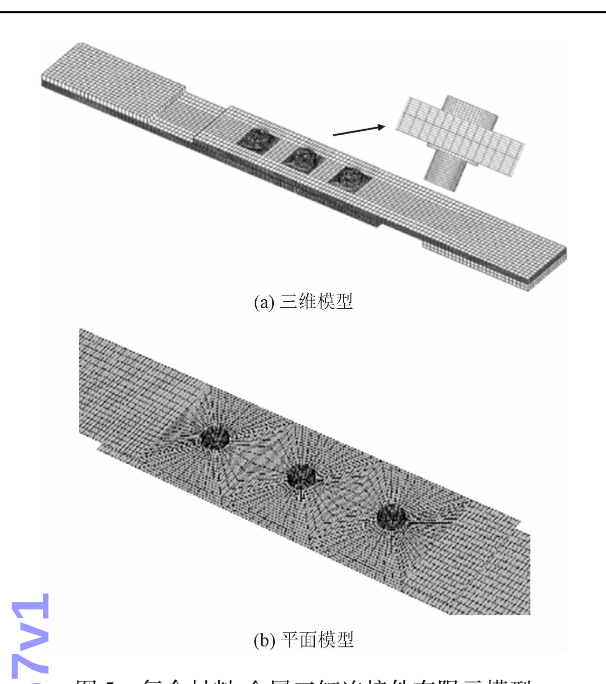



图 5　复合材料-金属三钉连接件有限元模型

Fig. 5　Finite element model of composite-metal three-bolt joint

## 3.2　混合结构壁板热应力有限元分析

为了简化建模工作量,取一半结构进行建模分析。建立该混合结构壁板平面模型如图 6 所示。复合材料板和金属板采用 S4R 单元,在孔边进行网格细化。施加初始 21 ℃ 的温度场,当降温至 −40 ℃ 时,得到结构热应力分布如图 7 所示。可以看出,壁板外侧螺钉孔边出现明显应力集中现象,内侧螺钉孔边应力集中程度大幅降低,且外侧螺钉对铝合金长桁起拉伸作用,对复合材料蒙面起压缩作用。

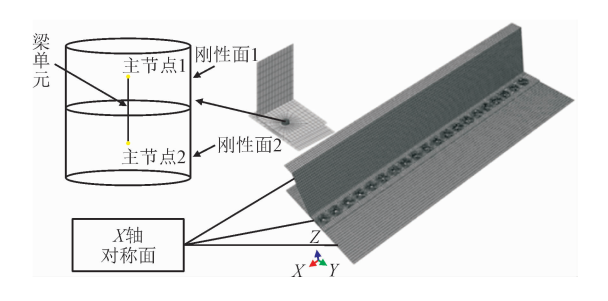



图 6　混合结构壁板平面模型

Fig. 6　Plate model of hybrid panel

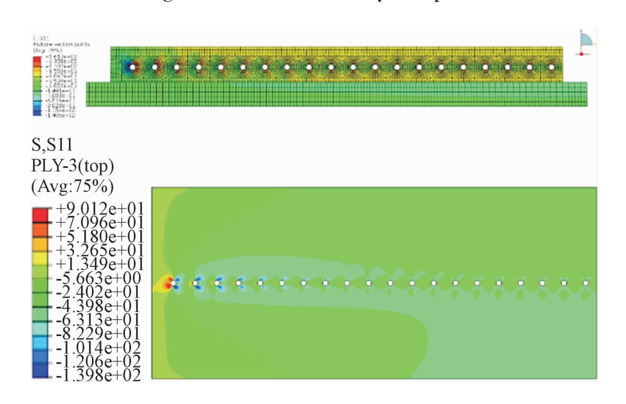



图 7　混合结构壁板 −40 ℃ 低温下热应力分析结果

Fig. 7　Thermal stress analysis result of hybrid panel under −40 ℃

通过有限元分析算得到 −40 ℃ 下的钉载如表 4 所示,其中,螺钉命名方式为结构最外侧螺钉为编号 1,由外向内依次增加。可以看出,混合结构壁板在低温下的载荷主要集中在两侧螺钉,分布规律为 U 型,符合相关论文中的结论。




**表 4　混合结构壁板低温下螺钉载荷有限元计算结果**

Tab. 4　Bolt load results of hybrid panel in low temperature by finite element analysis

| 螺钉序号 | 螺钉载荷/N | 螺钉序号 | 螺钉载荷/N | 螺钉序号 | 螺钉载荷/N | 螺钉序号 | 螺钉载荷/N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3 474.40 | 6 | 825.73 | 11 | 235.68 | 16 | 58.08 |
| 2 | 2 343.00 | 7 | 644.26 | 12 | 181.3 | 17 | 40.82 |
| 3 | 1 783.12 | 8 | 503.25 | 13 | 138.46 | 18 | 27.08 |
| 4 | 1 372.74 | 9 | 391.99 | 14 | 104.79 | 19 | 14.85 |
| 5 | 1 061.45 | 10 | 304.57 | 15 | 78.89 | 20 | 4.62 |

# 4　温度场下混合结构壁板试验研究

## 4.1　试验方法

在复合材料板和金属长桁上粘贴电阻式应变计,如图 8 所示。采用热输出修订法消除应变计由温度效应引起的指示应变,即采用和试验件相同的复合材料和铝合金试样,粘贴规格相同的应变计,通过在相同的温度条件下标定其热输出曲线,将试验件测量结果减去热输出,得到热应力引起的应变[28]。试验在中国飞机强度研究所气候实验室进行,温度波动在 ±2 ℃。试验条件分为常温 21 ℃、10 ℃、−10 ℃、−30 ℃、−40 ℃,5 种,当温度稳定后浸泡时间在 10 h 以上,保证试验件冷透。本试验在常温下进行调零,其他温度点保温后每间隔 10 min

采集一组数据。由于应变仪在气候实验室内工作，为了保证仪器不受低温的影响，将其放置在气候实验室中特制的保温箱对其进行保温防护，使其工作环境始终在 20 ℃左右。

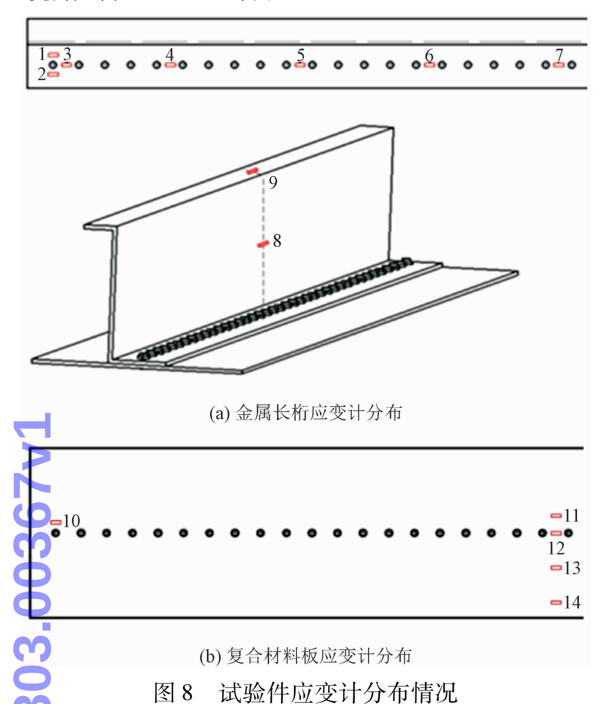



图 8 试验件应变计分布情况

Fig. 8 Strain gauge distribution in the hybrid panel

## 4.2 试验结果及仿真结果验证

壁板试验件和热输出标定试样在各温度点下的应变采集数据波动均在 10 $\mu\varepsilon$ 以内，表明试验件温度已稳定。对应变值进行平均，得到试验件各测点在 21 ℃、10 ℃、－10 ℃、－30 ℃、－40 ℃ 5 种温度下由热应力产生的应变如表 5 所示，应变分布规律如图 9 所示。可以看出应变和温度变化量基本保持线性关系，由于材料热膨胀系数在该温度范围内基本不变，且该载荷水平下结构的应力水平处于弹性阶段，因此线性关系符合预期。

对于混合壁板中金属长桁结构，由仿真分析结果可知，长桁中的热应力主要由靠近两端的螺钉产生的拉伸载荷引起，中间螺钉拉伸作用较小。

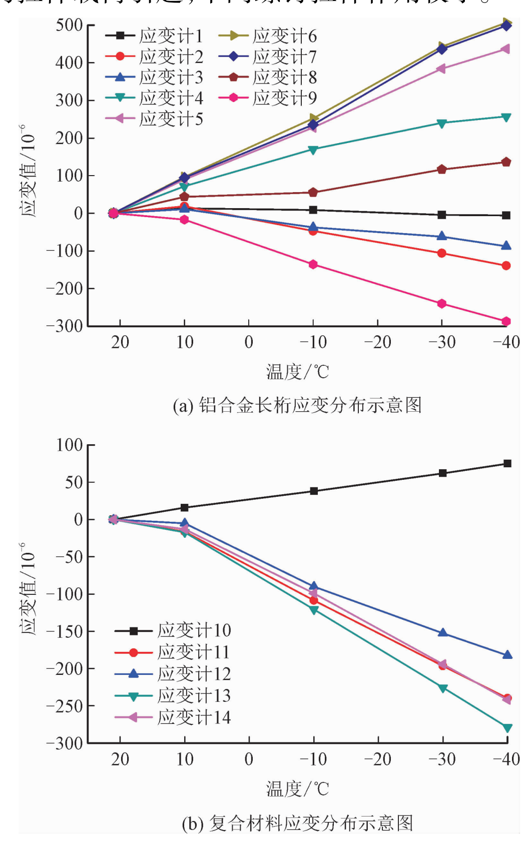



图 9 热应力引起的混合结构壁板应变

Fig. 9 Diagram of strain in hybrid panel induced by thermal stress

表 5 热应力引起的应变值

Tab. 5 Strain value induced by thermal stress

| 材料 | 表面应变计编号 | 应变值/10⁻⁶ | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 10 ℃ | －10 ℃ | －30 ℃ | －40 ℃ |
| 铝合金 | 1 | 13.04 | 8.64 | －4.36 | －5.40 |
| | 2 | 18.67 | －47.13 | －105.83 | －139.16 |
| | 3 | 11.08 | －37.72 | －62.12 | －87.70 |
| | 4 | 71.67 | 170.27 | 240.67 | 257.23 |
| | 5 | 90.21 | 227.81 | 384.31 | 436.88 |
| | 6 | 96.48 | 252.28 | 442.98 | 506.59 |
| | 7 | 94.59 | 235.79 | 436.19 | 498.42 |
| | 8 | 43.72 | 55.32 | 116.42 | 135.77 |
| | 9 | －16.86 | －135.46 | －239.76 | －287.03 |
| 复合材料 | 10 | 15.90 | 37.90 | 62.00 | 74.85 |
| | 11 | －16.41 | －108.61 | －196.61 | －239.80 |
| | 12 | －5.13 | －89.93 | －152.73 | －182.52 |
| | 13 | －17.37 | －120.77 | －225.57 | －278.81 |
| | 14 | －12.98 | －99.18 | －194.28 | －241.87 |

本研究从以下 2 方面说明仿真分析结果符合试验数据规律。

a)各低温工况下,3、4、5、6 号应变计区域的热应变值不断增加,且增幅不断降低,6、7 号应变计区域的热应变值基本一致。该现象是由于螺钉拉伸载荷从外侧到内侧依次降低,使得热应变从外侧到内侧的增加幅度不断降低,趋于稳定。

b)9 号应变计区域的热应变值为负值,承受压缩应力。该现象是由于长桁底部拉伸载荷产生的弯矩,使得长桁上部受压缩载荷。

对于混合壁板中复合材料蒙皮结构,由仿真分析结果可知,热应力主要由靠近两端的螺钉产生的压缩载荷引起。由试验数据可得,各低温工况下,11、12、13 和 14 号应变计区域的热应变均为负值,受压缩载荷作用。此外,11、13 和 14 号应变计数值相差较小,说明中部螺栓未出现较大载荷。仿真分析结果符合试验数据规律。

下面以该壁板在 -40 ℃低温的应变数据为分析对象，对比几组测点有限元仿真结果和试验值，如表 6 所示。其中，孔边的 1、2、3、10 号应变计区域由于应力集中效应，应变值变化幅度较大，不进行试验值和仿真值的对比。考虑到小应变测量中本身的误差较大，仿真结果和试验值的一致性较好。

**表 6　测点的仿真与试验值对比(-40 ℃低温工况)**

Tab. 6　Comparison between simulation and test values of test points(-40 ℃)

| 应变计序号 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 11 | 12 | 13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 仿真值/$10^{-6}$ | 260 | 450 | 572 | 573 | 163 | -286 | -291 | -181 | -279 |
| 试验值/$10^{-6}$ | 257 | 437 | 507 | 498 | 136 | -287 | -240 | -183 | -279 |

## 5　结　论

针对混合结构壁板在低温下的热应力分析,本研究通过有限元仿真及试验方法获取了该结构在温度场下的力学行为,主要研究结论如下。

1)针对多钉连接结构三维模型建模难的问题,本研究给出了平面模型建模方法。通过三钉连接件算例分析,验证了建模方法的准确性,该建模方法能有效减低多钉连接结构建模难度及计算量。

2)通过在气候实验室开展 40 螺钉混合结构壁板的低温环境试验,获取了结构各测点在不同温度条件下的应变数据,该数据和温度值基本保持线性关系,符合预期,验证了试验方法的准确性。

3)通过对比有限元分析结果和试验数据,结果表明仿真分析结果符合试验数据规律,且应变仿真值和试验值具有较好的一致性。本研究的仿真分析方法既有较好的准确性,可以为后续强度分析等提供基础。



**参考文献:**

[1] 孙振起,吴安如. 先进复合材料在飞机结构中的应用[J]. 材料导报,2015,29(11):61-64.
SUN Zhenqi,WU Anru. Application of advanced composite in aircraft structures[J]. Materials review,2015,29(11):61-64(in Chinese).

[2] 赵振业,赵英涛,何鲁林,等. 先进飞机结构材料的发展[J]. 材料工程,1995(1):4-8.
ZHAO Zhenye,ZHAO Yingtao,HE Lulin,et al. The development of structural materials of advanced aircraft[J]. Journal of materials engineering,1995(1):4-8(in Chinese).

[3] 马立敏,张嘉振,岳广全,等. 复合材料在新一代大型民用飞机中的应用[J]. 复合材料学报,2015,32(2):317-322.
MA Limin,ZHANG Jiazhen,YUE Guangquan,et al. Application of composites in new generation of large civil aircraft[J]. Acta materiae compositae Sinica,2015,32(2):317-322(in Chinese).

[4] 中国飞机强度研究所. 一种飞机机械连接结构热应力等效施加装置:CN202210574979.8[P]. 2022-06-24.

[5] 郑洁,赵占文. 温热环境对复合材料结构承载能力影响试验研究[J]. 航空科学技术,2017,28(3):55-58.
ZHENG Jie,ZHAO Zhanwen. Experimental research on the influence of hygrothermal environment on compressive carrying capacity of composite stiffened plates[J]. Aeronautical science & technology,2017,28(3):55-58(in Chinese).

[6] 苏杰,李亚智,杨帆,等. 复合材料连接件钉载分配与孔周应力解析计算[J]. 应用力学学报,2015,32(5):717-723.
SU Jie,LI Yazhi,YANG Fan,et al. An analytical investigation on the pin-load and stress distributions in composite joints[J]. Chinese journal of applied mechanics,2015,32(5):717-723(in Chinese).

[7] 贾云超,关志东,宋晓君. 复合材料-金属机械连接性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2015(4):66-70.
JIA Yunchao,GUAN Zhidong,SONG Xiaojun. Study on performance of composite-metal mechanical joints[J]. Fiber reinforced plastics/composites,2015(4):66-70(in Chinese).

[8] 张浩宇,侯波,何宇廷,等. 航空复合材料-金属连接结构的拉伸性能及其渐进损伤[J]. 机械工程材料,2017,41(8):87-92.
ZHANG Haoyu,HOU Bo,HE Yuting,et al. Tensile property of

aeronautical composite-metal joint structure and its progressive damage[J]. Materials for mechanical engineering,2017,41(8):87-92(in Chinese).
[9] 侯赤,周银华,全泓玮,等. 混合结构中金属疲劳对层合板损伤的影响[J]. 西北工业大学学报,2018,36(1):74-82.
HOU Chi,ZHOU Yinhua,QUAN Hongwei,et al. The effect of metal on composites fatigue damage in mixed structure[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,2018,36(1):74-82(in Chinese).
[10] 魏冉,刘龙权,汪海. 复合材料-钛合金多钉连接结构疲劳试验研究[J]. 机械科学与技术,2012,31(12):1997-2002.
WEI Ran,LIU Longquan,WANG Hai. Experimental study of the fatigue performance in multi fastener composite-to-titanium single lap joints[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering,2012,31(12):1997-2002(in Chinese).
[11] KRADINOV V,BARUT A,MADENCI E,et al. Bolted double-lap composite joints under mechanical and thermal loading[J]. International journal of solids and structures,2001,38(44/45):7801-7837.
[12] 朱梓珣. 飞机复合材料层合板与金属连接结构热效应分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019:62-63.
[13] YANG C,SUN W J,SENEVIRATNE W,et al. Thermally induced loads of fastened hybrid composite/aluminum structures[J]. Journal of aircraft,2008,45(2):569-580.
[14] LEI K,WANG B W,WU J T,et al. Temperature-induced load of bolted hybrid composite/metal joint[C]//32th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. German:ICAS,2021:1-11.
[15] 蔡启阳,赵琪. 环境温度和间隙对复合材料-金属混合结构机械连接钉载分配的影响[J]. 复合材料学报,2021,38(12):4228-4238.
CAI Qiyang,ZHAO Qi. Effects of temperature and clearance fit on the load distribution of composite-metal hybrid structures[J]. Acta materiae compositae Sinica,2021,38(12):4228-4238(in Chinese).
[16] 邓文亮,成竹,唐虎. 复合材料/金属混合结构热应力分布规律[J]. 应用力学学报,2020,37(2):550-557.
DENG Wenliang,CHENG Zhu,TANG Hu. Thermal stress distribution law of hybrid composite metal structures[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(2):550-557(in Chinese).
[17] 邓文亮,唐虎,成竹. 温度对复材与金属混合结构钉载分配的影响[J]. 工程与试验,2018,58(3):27-30.
DENG Wenliang,TANG Hu,CHENG Zhu. Influence of temperature on nail load distribution of composite and metal structures[J]. Engineering & test,2018,58(3):27-30(in Chinese).
[18] 杨俊清. 金属与复材混杂连接结构的热应力研究[J]. 民用飞机设计与研究,2022(2):15-20.
YANG Junqing. Study on thermal stress of hybrid joint structure of composite and metal[J]. Civil aircraft design & research,2022(2):15-20(in Chinese).
[19] 郭居上. 温度场中复合材料板与铝合金板钉接结构内应力研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013:19-30.
[20] 魏洪,郑茂亮,范瑞娟. 复合材料与金属结构连接热应力有限元分析[J]. 航空科学技术,2015,26(9):33-36.
WEI Hong,ZHENG Maoliang,FAN Ruijuan. Finite element analysis on thermal stress of the connection structure between composite and metal sheet[J]. Aeronautical science & technology,2015,26(9):33-36(in Chinese).
[21] 高阳. 某型飞机中央翼关键连接区混杂结构试验仿真与分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.
[22] 王遵,曾竟成,肖加余,等. 复合材料补片胶接补强铝合金板残余热应力研究[J]. 中国表面工程,2006,19(增刊1):215-218.
WANG Zun,ZENG Jingcheng,XIAO Jiayu,et al. Thermal residual stresses in bonded composite repair of aluminum substrates[J]. China surface engineering,2006,19(S1):215-218(in Chinese).
[23] 牛勇,穆志韬,李旭东,等. 含裂纹金属板复合材料胶接修补结构残余热应力分析[J]. 玻璃钢/复合材料,2016(5):23-29.
NIU Yong,MU Zhitao,LI Xudong,et al. Thermal residual stress analysis of bonded composite repairs to cracked metallic plate[J]. Fiber reinforced plastics/composites,2016(5):23-29(in Chinese).
[24] 赵丽滨,徐吉峰. 先进复合材料连接结构分析方法[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2015:84-88.
[25] 中国飞机强度研究所. 一种混合结构机械连接件钉载的获取方法和装置:CN202010990020. 3[P]. 2021-01-12.
[26] 汪浩成. 温湿度对T700S/#2510和G30-500/TC275复合材料力学性能的影响[D]. 南昌:南昌大学,2014:64-66.
[27] 陈鼎,陈振华. 铝合金在低温下的力学性能[J]. 宇航材料工艺,2000,30(4):1-7.
CHEN Ding,CHEN Zhenhua. Mechanical properties of pure aluminum alloys at cryogenic temperatures[J]. Aerospace materials & technology,2000,30(4):1-7(in Chinese).
[28] 刘砚涛,王莉敏,吴兵,等. 低温静力试验热应变/热应力修正方法研究[J]. 强度与环境,2014,41(2):34-38.
LIU Yantao,WANG Limin,WU Bing,et al. Research of modifying thermal strain/stress in low temperature static test[J]. Structure & environment engineering,2014,41(2):34-38(in Chinese).

（编辑　黄崇亚　李坤璐）